

# 基于高重复频率锁模脉冲放大产生超连续谱的实验研究

李 磐<sup>1,2</sup> 时 雷<sup>1</sup> 王学锋<sup>2</sup> 王军龙<sup>2</sup> 毛庆和<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所安徽省光子器件与材料重点实验室,安徽 合肥 230031

<sup>2</sup>北京航天控制仪器研究所,北京 100854

**摘要** 通过实验实现重复频率为 168 MHz、中心波长为 1040 nm、输出功率为 270 mW 的全正色散耗散孤子锁模光纤激光器;利用双包层掺 Yb 光纤对其进行放大,最大输出平均功率可达 12 W。通过放大脉冲抽运高非线性光子晶体光纤(PCF),最终获得光谱范围为 600~2000 nm、输出功率为 9.14 W 的超连续谱,并对放大的皮秒脉冲产生超连续谱过程和机理进行定性解释。

**关键词** 光纤光学;超连续谱;锁模光纤激光器;脉冲放大

**中图分类号** TN242; O437 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201535.s214006

## Experimental Investigation of the Supercontinuum Generated by Amplificated High Repetition Mode-Locked Pulses

Li Pan<sup>1,2</sup> Shi Lei<sup>1</sup> Wang Xuefeng<sup>2</sup> Wang Junlong<sup>2</sup> Mao Qinghe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>2</sup>Beijing Aerospace Control Instrument Research Institute, Beijing 100854, China

**Abstract** A 168 MHz high repetition all-normal-dispersion mode-locked ring fiber laser is realized experimentally. The wavelength of the fiber laser is 1040 nm and output power is about 270 mW. The output pulses are amplified by using double cladding Yb-doped fiber and the max average output power reaches 12 W. By pumping the high nonlinear photonic crystal fiber (PCF) with the amplified high repetition pulses, the supercontinuum with average power of 9.14 W and spectrum range from 600 nm to 2000 nm are obtained. The mechanism of the supercontinuum generated by amplified pulses is qualitatively explained.

**Key words** fiber optics; supercontinuum generation; mode-locked fiber laser; pulse amplification

**OCIS codes** 140.3510; 140.4050; 140.4480; 190.7110

## 1 引 言

超连续谱(SC)光源,在光学精密计量、光学相干成像、非线性光谱学等领域具有重要应用,近年来引起广泛关注<sup>[1-3]</sup>。迄今,采用飞秒激光抽运具有高非线性、色散可控、无限单模特征的光子晶体光纤(PCF),可获得倍频程谱宽的超连续谱<sup>[4]</sup>。除了谱宽,在许多应用领域,如光谱学等对超连续谱功率谱密度同样具有较高要求。为提高超连续谱功率谱密度,各种高功率激光用于产生超连续谱<sup>[5-10]</sup>。宋锐等<sup>[11]</sup>报道了利用腔外倍增种子源脉冲重复频率,再利用主振荡功率放大(MOPA)技术提升功率方案,获得高达 177.6 W 的超连续谱输出。近年来,随着锁模光纤激光的发展,其输出功率、重复频率和单脉冲能量都有很大提高<sup>[12-13]</sup>,若

**收稿日期:** 2015-01-10; **收到修改稿日期:** 2015-02-11

**基金项目:** 国家自然科学基金(61250017,61377044,61275186)、国家 973 计划(2013CB934304)

**作者简介:** 李 磐(1986—),男,博士研究生,工程师,主要从事光纤激光方面的研究。E-mail:lipan\_clark@126.com

**导师简介:** 毛庆和(1963—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光纤光学等方面的研究。

E-mail:mqinghe@aiofm.ac.cn(通信联系人)

直接采用 MOPA 放大高重复频率耗散孤子种子脉冲源,则有望进一步简化超连续谱产生系统并提高其稳定性。通过实验优化基于非线性偏振旋转(NPE)全正色散耗散孤子锁模光纤激光器,获得中心波长为 1040 nm、重复频率为 168 MHz 的皮秒脉冲,输出功率为 270 mW;以此耗散孤子脉冲源作为种子光源进行一级放大,将输出平均功率提升至 12 W;将放大后脉冲输入到高非线性 PCF,获得光谱范围为 600~2000 nm,输出功率为 9.14 W 的超连续谱,并对超连续谱产生过程和机理做了定性解释。

## 2 实验原理及方案

基于高重复频率锁模脉冲放大产生超连续谱的工作原理是将高重复频率锁模光纤激光器输出脉冲进行放大,获得高峰值功率脉冲,再将放大后脉冲输入到高非线性 PCF,经高峰值功率脉冲在高非线性 PCF 中色散非线性传输后产生超连续谱。其实验方案如图 1 所示,主要分为高重复频率全正色散锁模光纤激光器、脉冲放大和超连续谱产生 3 部分。其中脉冲源是基于 NPE 的环形腔全正色散锁模激光器<sup>[12]</sup>,抽运半导体激光器中心波长为 975 nm,最大抽运功率约为 500 mW,输出功率通过波分复用器(WDM)耦合至掺杂光纤;在腔内使用光纤隔离(ISO)保证光单向传输;在两准直器之间使用 2 个 1/4 波片(QWP),1 个 1/2 波片(HWP)和 1 个偏振分束棱镜(PBS)实现类可饱和吸收体,两准直器的插入损耗为 0.7 dB;带通干涉滤光片(BF)中心波长为 1040 nm,带宽为 8 nm,插入损耗约为 1.5 dB;环形腔内所有光纤都为单模光纤 HI1060,WDM 和 ISO 之间的单模光纤约为 10 cm。激光由 PBS 反射端输出,经 1/2 波片和反射镜 M 后由单模光纤准直器耦合回光纤。放大部分由最高输出功率为 25 W 的高功率抽运源、合束器、双包层掺 Yb 光纤(DC-YDF)构成;种子脉冲经放大器后输入到 PCF。

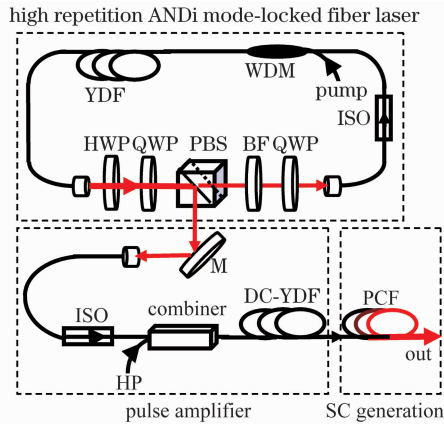


图 1 高重复频率脉冲放大产生超连续谱的实验装置图

Fig. 1 Schematic of the SC generated by amplified high repetition mode-locked pulse

为了获得高重复频率脉冲,激光器腔内采用小信号吸收系数大于 2000 dB/m 的高掺杂 Yb 光纤,长度为 12 cm;腔内两准直器之间的距离缩短至 8 cm;WDM 和 ISO 之间光纤长度缩短至 10 cm;整个激光器腔长约为 1.2 m。

## 3 结果与讨论

在实验中,当抽运功率为 480 mW 时,通过精细调节 3 个波片可使图 1 全正色散锁模光纤激光器部分获得稳定锁模。经测量,此时激光器输出平均功率为 270 mW,计算可得输出单脉冲能量为 1.61 nJ。图 2(a)为全正色散锁模光纤激光器输出脉冲光谱,由图可见,脉冲光谱具有陡峭边沿,中间部分凹陷,是典型的耗散孤子光谱,宽度约为 27 nm。图 2(b)为输出脉冲的射频(RF)频谱,由图可见,输出脉冲重复频率为 167 MHz,与激光器腔长相对应。输出脉冲信噪比大于 65 dB,即激光器具有良好的噪声特性。

由于种子源脉冲输出功率较高,因此直接将其输入 DC-YDF 中进行放大,DC-YDF 长度约为 3 m,在 975 nm 处的吸收系数约为 11 dB/m。图 3 为种子脉冲放大后平均输出功率与抽运功率间的关系。由图可见,当放大器抽运功率为零时,输出信号脉冲的平均功率为零;当抽运功率增加时,输出信号功率随放大器的

抽运功率增加几乎呈线性增加, 光光转换效率约为 54.3%, 当抽运功率达到 22 W 时, 输出功率为 11.95 W, 对应的脉冲能量约为 71.5 nJ。

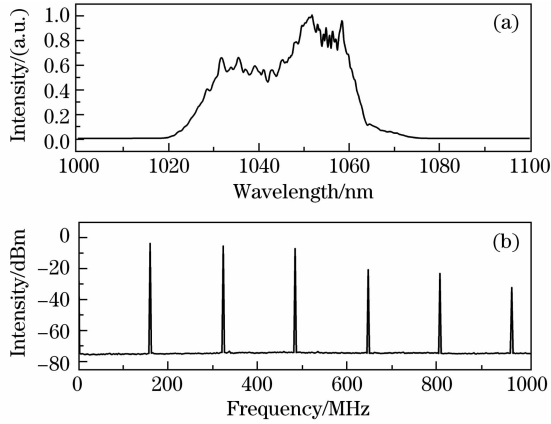


图 2 输出脉冲(a)光谱和(b)RF 频谱(扫描范围 0~1 GHz, 扫描精度 10 kHz)  
 Fig. 2 (a) Spectrum and (b) RF spectrum of output pulses  
 (scanning range is 0–1 GHz, resolution bandwidth is 10 kHz)

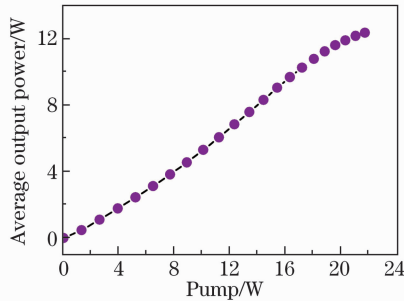


图 3 放大后脉冲输出功率随抽运功率变化

Fig. 3 Average output power of amplified pulse as the function of the pump

为了产生超连续谱, 在双包层光纤 (DC-YDF) 后面熔接一段无源双包层光纤, 然后与 7 m 长的 PCF (NKT Photonics, 超连续谱-5.0-1040) 熔接, 熔接损耗约为 1.2 dB。为防止端面损伤, 在 PCF 后熔接一段多模光纤, 并将多模光纤输出端面切成斜 8°, 同时监视超连续谱的输出功率和光谱。逐步增加高功率放大器抽运源, 其输出超连续谱如图 4 所示。

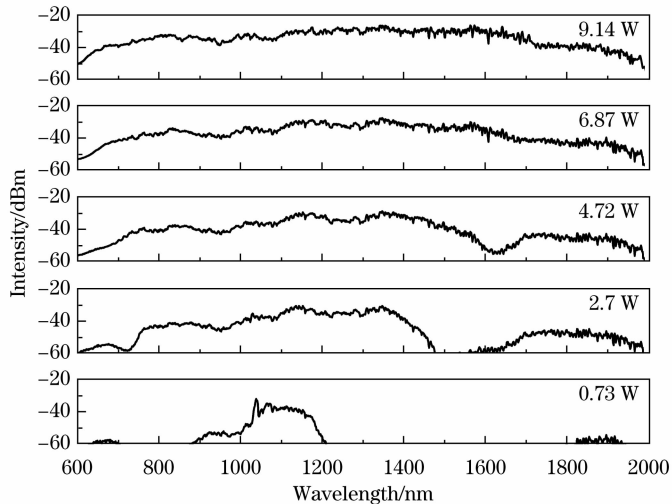


图 4 输出超连续谱光谱随功率变化图

Fig. 4 Generated SC as the function of the average output power

由图可见,当输出功率为 0.7 W 时,光谱主要集中在抽运脉冲中心波长 1040 nm 附近,20 dB 光谱带宽约为 80 nm,光谱展宽程度小;虽然在短波长 680 nm 和长波长 1900 nm 附近都有光谱辐射,但功率谱密度低。原因是抽运脉冲激光功率较低,单脉冲能量和峰值功率较小,光谱展宽主要是由自相位调制(SPM)和调制不稳定性(MI)引起;MI 峰值增益与脉冲峰值功率成正比<sup>[4]</sup>,且 MI 导致脉冲破裂的特征距离  $L_{MI} \approx 16L_{NL}$ <sup>[1]</sup> ( $L_{NL}$  为非线性特征长度<sup>[4]</sup>);虽然脉冲在 PCF 传输过程中由 MI 最终导致了孤子裂变,但是发生孤子裂变距离长,裂变孤子数少且裂变后孤子在 PCF 中传输距离短,因此在短波和长波方向辐射色散功率谱密度极低,超连续谱光谱宽度窄。

当输出功率增加到 2.7 W 时,光谱范围已经扩展到 800~1400 nm,但光谱起伏较大,平坦性较差。这时,抽运脉冲能量和峰值相比 0.7 W 时已经大为提高,MI 增益也同样增加,脉冲发生孤子裂变的距离较 0.7 W 时发生孤子裂变的距离短,裂变后孤子数目增加,辐射色散波和孤子自频移效应增强,所以光谱相比 0.7 W 时已大为展宽。

当输出功率增加到 4.72 W 时,光谱宽度增加有限,但光谱平坦性开始变好,短波长已经扩展到 700 nm,长波长依然处在 1400 nm 附近,相比于 2.7 W,4.2 W 的输出功率增加不大,因此,光谱向短波长和长波长扩展都有限,再加上超连续谱-5.0-1040 型 PCF 在 1400 nm 附近损耗较大,导致超连续谱在 1400 nm 附近的功率谱密度因损耗而相对较低。

当输出功率进一步增加到 6.87 W 和 9.14 W 时,光谱宽度继续变宽。主要原因是,随着抽运脉冲能量和峰值功率的提高,MI 增益进一步增大,导致脉冲破裂的距离进一步缩短,孤子裂变效应形成的孤子在拉曼自频移效应下向长波方向扩展,同时辐射短波长色散波,短波长色散波和孤子之间的相互作用使得短波长方向也在扩展;并且,由于孤子阶数增加,孤子裂变产生的孤子数目多,诸多孤子光谱叠加使输出光谱从 600 nm 一直持续到 2000 nm,且平坦性较好。

## 4 结 论

采用高重复频率锁模脉冲放大产生超连续谱的实验方案,获得光谱范围为 600~2000 nm,输出功率为 9.14 W 的超连续谱;产生超连续谱模式间隔宽且稳定,单个模式功率密度高、光谱平坦度好。该实验方案无需腔外倍增种子脉冲重复频率,简化了种子脉冲源结构;无需采用预放大,降低了放大级的复杂度,对高功率超连续谱产生具有一定参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135.
- 2 Dudley M. Supercontinuum Generation in Optical Fibers[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- 3 Zhang Bin, Yang Weiqiang, Hou Jing, *et al.*. All-fiber mid-infrared supercontinuum source from 1.9  $\mu\text{m}$  to 4.3  $\mu\text{m}$ [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1102013.
- 4 张 斌, 杨未强, 侯 静, 等. 1.9~4.3  $\mu\text{m}$  全光纤中红外超连续谱光源[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1102013.
- 5 Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics (4th ed)[M]. New York: Elsevier, 2007.
- 6 Rulkov A, Vyatkin M, Popov S, *et al.*. High brightness picosecond all-fiber generation in 525~1800 nm range with picosecond Yb pumping[J]. *Optics Express*, 2005, 13(2): 377-381.
- 7 Travers J C, Rulkov A B, Cumberland B A, *et al.*. Visible supercontinuum generation in photonic crystal fibers with a 400 W continuous wave fiber laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14435-14447.
- 8 Chen K K, Alam S, Price J H V, *et al.*. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power[J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5426-5432.
- 9 Chen H, Chen S, Wang J, *et al.*. 35 W high power all fiber supercontinuum generation in PCF with picosecond MOPA laser[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(23): 5484-5487.
- 10 Chen Shengping, Chen Hongwei, Hou Jing, *et al.*. 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 1943-1949.
- 11 陈胜平, 谌鸿伟, 侯 静, 等. 30 W 皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 1943-1949.
- 12 Liu Chu, Rees E, Laurila T, *et al.*. Experimental research on supercontinuum generation from nanosecond pulse and conventional single mode fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0705003.

- 刘 楚, Rees E, Laurila T, 等. 纳秒脉冲在普通单模光纤中产生超连续谱的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0705003.
- 11 Song Rui, Hou Jing, Chen Shengping, *et al.*. All-fiber 177.6 W supercontinuum source[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5):054217.
- 宋 锐, 侯 静, 陈胜平, 等. 177.6 W 全光纤超连续谱光源[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 054217.
- 12 Wise F W, Chong A, Renninger W H. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion[J]. Laser & Photonics Reviews, 2008, 2(12): 58–73.
- 13 Yang H, Wang A, Zhang Z. Efficient femtosecond pulse generation in an all-normal-dispersion Yb: fiber ring laser at 605 MHz repetition rate[J]. Optics Letters, 2012, 37(5): 954–956.

栏目编辑: